



**İNSANSI MİMİKLERE SAHİP ANİMATRONİK ROBOT
SURAT TASARIMI VE İMALATI**

Furkan TÛTÛNCÛ



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSI MİMİKLERE SAHİP ANİMATRONİK ROBOT SURAT TASARIMI
VE İMALATI**

Furkan TÛTÛNCÛ
501910053
0000-0002-8185-3480

Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR
0000-0003-0816-4029
(Danışman)

YÛKSEK LİSANS TEZİ
KONSTRÛKSİYON VE İMALAT ANABİLİM DALI

BURSA – 2022
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANSI MİMİKLERE SAHİP ANİMATRONİK ROBOT SURAT TASARIMI VE İMALATI **Furkan TÜTÜNCÜ**

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

Bu çalışmada, günümüzde önemi her geçen gün artan ve üzerine yeni çalışmalar gerçekleştirilen insansı robotlar geliştirmek, insan mimiklerini gerçekçi şekilde simüle edecek mekanizmalar tasarlamak ve bu tasarımları gerçekçi boyutlarda bir araya getirerek insansı bir yapı oluşturmak amaçlanmıştır. Türkiye’de benzer konudaki araştırmalar çok kısıtlı sayıda olduğundan, bu proje öncü proje niteliği taşımaktadır.

Hedeflenen kapsam, duygu ifadelerini gerçeğe yakın şekilde simüle ederek herkes tarafından anlaşılır mimik hareketler oluşturmaktır.

Yapılan çalışmada dikkat edilen önemli bir diğer husus ise maliyettir. Günümüzde yaygınlığı fazlasıyla artan ve bir çeşit eklemeli imalat yöntemi olan üç boyutlu yazıcılar ve plastik malzeme kullanılarak maliyet düşürülmüştür. Projenin hedefi duygu ifadelerini gerçekçi jest ve mimiklerle ifade etmek olduğu için, tasarım odaklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle yeterli dayanıklılığa sahip plastik malzeme ve tasarlanan mekanizmaları hareket ettirmek için yeterli seviyedeki hobi servo motorları kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansı, Robot, Mimik, Animatronik, Duygu, Mekanizma
2022, vii + 38 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

ANIMATRONIC ROBOT FACE DESIGN AND MANUFACTURE WITH HUMANOID GESTURES

Furkan TÜTÜNCÜ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Construction and Manufacture

Supervisor: Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR

In this study, it is aimed to obtain information about humanoid robots, of which importance is increasing day by day and new studies are being conducted on them, to design mechanisms that will simulate human facial expressions realistically, and to create a humanoid structure by bringing these designs together in realistic dimensions. Since there are very limited number of studies on similar subjects in Turkey, this project is a pioneer.

The targeted scope is to create face expressions that are understandable by everyone by simulating emotional expressions close to reality.

Another important consideration in the study is the cost. The cost has been reduced by using three-dimensional printers and plastic materials, which are a kind of additive manufacturing method, which has become more prevalent today. Since the aim of the project is to express emotional expressions with realistic gestures and facial expressions, a design-oriented study was carried out. For this reason, enough durable plastic materials and hobby servo motors are used to move the designed mechanisms.

Key words: Humanoid, Robot, Expressions, Animatronic, Gestures, Mechanism
2022, vii + 38 pages.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, üç boyutlu yazıcının kullanılmasının getirdiği pratiklik ve maliyet avantajının yanında, parçaların gerekli hareketleri, gerekli dayanıklılık ile gerçekleştirmesi için boyut ve toleranslarında oluşan kısıtlar projedeki önemli zorluklardan biri olmuştur. Boyut ve toleranslardaki bu kısıt, insansı robotun gerçekçi boyutlarda kalmasını zorlaştırmış ve bazı taslak tasarımlarda revizyonu zorunlu kılmıştır.

Tez konu araştırmasındaki danışmanlığı başta olmak üzere bu projede gerçekleştirilen çalışmalar konusundaki desteği, yol gösterici önerileri ve düzenlemelerdeki yardımları için danışmanım Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Furkan TÜTÜNCÜ

.../.../.....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	7
3.1. Kaş Bölgesi.....	7
3.1.1. Kaş Mekanizmasının Tasarımı.....	7
3.1.2. Kaş Mekanizmasının Hareket Şeması.....	9
3.2. Göz Bölgesi.....	9
3.2.1. Göz Mekanizmasının Tasarımı.....	10
3.3. Ağız Bölgesi.....	12
3.3.1. Dudakların Hareket Analizi.....	12
3.3.2. Çenenin Hareket Analizi.....	13
3.3.3. Çene ve Dudak Mekanizmasının Tasarımı.....	14
3.4. Animatronik Robot Suratın İmalatı.....	17
3.4.1. Animatronik Robot Suratın Mekanizmalarının İmalatı.....	17
3.4.2. Animatronik Robot Suratın Kullanılan Dişlerin İmalatı.....	19
3.4.3. Animatronik Robot Suratın Kullanılan Ara Bağlantıların İmalatı.....	19
3.5. Animatronik Robot Suratın Elektronik Tasarımı.....	21
3.5.1. Mikro Kontrolcü ve Servo Motor Sürücüsü.....	22
3.5.2. Voltaj Regülatörü.....	23
3.5.3. Servo Motorlar.....	24
3.5.3.1. MG90S Mikro Servo Motor.....	25
3.5.3.2. MG995 Servo Motor.....	26
3.6. Animatronik Robot Suratın Yazılımı.....	27
3.7. Animatronik Robot Suratın Maliyeti.....	30
4. BULGULAR.....	32
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	36
KAYNAKLAR.....	39
ÖZGEÇMİŞ.....	40

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

₺	Türk Lirası
kW	Kilo Watt
μs	Mikro Saniye

Kısaltmalar

Kısaltmalar	Açıklama
PLA	Biopolimer Polilaktik Asit
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
STL	Standard Triangle Language (Standart Üçgen Dili)
DOF	Degrees of Freedom (Serbestlik Derecesi)
PWM	Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1. Hanson Robotics Firmasının Ürettiği Albert HUBO (Oh ve diğerleri, 2006).	2
Şekil 2. İnsan Hareketlerini Algılayan ve Simüle Edebilen Bir Tasarımın Donanım Şeması (Chen ve diğerleri, 2021).	3
Şekil 3. Robert Fitzpatrick 'in Yüz Takip Sistemi ile Çalışan Animatronik Robot Suratın Mekanik Tasarımı (Fitzpatrick, 2010).	4
Şekil 4. Kablo Mekanizması ile Kas Kontrolü Gerçekleştirilen Bir Robot Surat (Chen, Boyuan ve Hu, Yuhang ve Li, Lianfeng ve Cummings, Sara ve Lipson, Hod, 2021)	5
Şekil 5. Kaşın Temel Konumları (Fitzpatrick, 2010).	7
Şekil 6. Kaş Mekanizmasının İzometrik Görünüşü	8
Şekil 7. Kaş Mekanizmasının Hareket Menzili.	9
Şekil 8. Gözlerin Hareketleri.	9
Şekil 9. Göz Mekanizmasının İzometrik Görünüşü	10
Şekil 10. Göz Kürelerinin Hareket Mekanizması ve Mafsallı Bağlantı Parçaları ..	11
Şekil 11. Farklı Duygu Durumlarında Dudak Hareketlerinin İncelenmesi.	12
Şekil 12. Çene Eklemi Hareket Analizi	13
Şekil 13. Ağız Mekanizmasının Genel Tasarımı	14
Şekil 14. Ağız Mekanizmasının Önden Görünüşü.	15
Şekil 15. Dudak ve Yanak Mekanizmalarının Hareket Menzilleri	16
Şekil 16. Çene Mekanizmasındaki Slotlu Tasarımın Detaylı İncelemesi	16
Şekil 17. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Mekanizmasının Tabanının Basımı	17
Şekil 18. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Mekanizmasının Motor Tutucularının Basımı	18
Şekil 19. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Kürelerinin Mekanizmasının Basımı.	18
Şekil 20. Polimer Kil ile Üretilen Diş Modeli	19
Şekil 21. Balık Gözü Mafsallı Tasarımı	20
Şekil 22. Farklı Bölgelerde Kullanılan Mafsallı Bağlantı Parçalarının Tasarımı ...	21
Şekil 23. 32 Kanal Servo Sürücü Kartı	22
Şekil 24. Dijital Göstergeli Voltaj Regülatörü	24
Şekil 25. MG90S Mikro Servo Motor	25
Şekil 26. MG995 Servo Motor	26
Şekil 27. Kontrolcü Kart Yazılımının Arayüzü	27
Şekil 28. Kontrolcü Kart Yazılımında Özelleştirme Ekranı	28
Şekil 29. Kontrolcü Kart Yazılımında 19 DOF Robot Arayüzü	28
Şekil 30. Kontrolcü Kart Yazılımında Kontrol Paneli	29
Şekil 31. Animatronik Robot Suratın Bilgisayar Ortamında Modellemesi	32
Şekil 32. Animatronik Robot Suratın Temel Mekanizma Montajı	33
Şekil 33. Animatronik Robot Suratın Tamamlanmış Hali	33
Şekil 34. Animatronik Robot Suratın Farklı Duygu Durumlarını Simüle Edişini	34

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1. 32 Kanal Servo Sürücü Kartının Özellikleri.....	23
Çizelge 2. Dijital Göstergeli Voltaj Regülatörünün Özellikleri.....	24
Çizelge 3. MG90S Mikro Servo Motorun Özellikleri	25
Çizelge 4. MG995 Servo Motorun Özellikleri.....	26
Çizelge 5. Animatronik Robot Suratın Üç Boyutlu Baskı Maliyetleri	30
Çizelge 6. Animatronik Robot Suratın Elektronik Komponent Maliyetleri	31



1. GİRİŞ

Teknoloji geliştikçe insana destek olacak ve insan gücünü azaltacak makineler üretilmektedir. Bu sayede insanlar için tehlikeli, yorucu ve istenmeyen işler yerine getirilebilmektedir. Bu makineler basitten karmaşığa çeşitli formlarda olmakla birlikte gün geçtikçe insanın yerini alacak makineler insana daha çok benzemeye başlamıştır. Eski yıllardan beri bilim kurgu filmlerine konu olan insansı robotlar hakkında günümüzde çalışmalar hız kazanmış ve ivmelenerek devam etmektedir. Bu alanda özellikle yabancı kaynaklar daha zengindir. Dünya genelinde yapılan çalışmaların sayısına bakıldığında Türkiye 'de neredeyse yok denecek kadar az olan çalışma sayısı, insansı robotlar üzerine daha fazla çalışma ve araştırma yapılması gerektiğini göstermektedir.

İnsansı Yüz Mimiklerine Sahip Animatronik Robot Surat Tasarımı ve İmalatı adlı bu proje, bu nedenle Türkiye 'de öncü nitelik taşıyan projelerdendir.

İnsansı robot surat tasarımında, standartlaştırılmış tasarımlardan yararlanıldığı gibi yeni tasarımlar da üretilmiş, tasarım kadar maliyet de ön planda tutulmuştur. Üretilebilecek tüm parçalar üç boyutlu yazıcı yardımı ile PLA filamentten üretilmiştir. Bu sayede prototipleme kolaylığı ve maliyet avantajı sağlanmıştır. Bulunabilirlik konusunda karşılaşılan zorluklar nedeni ile kullanılan küresel mafsal, yüz mekanizmalarında zorlayıcı bir kuvvete gerek duyulmadığı için, bilgisayar ortamında yeniden tasarlanarak üç boyutlu yazıcı yardımı ile yine plastik malzemedен üretilmiş ve kullanılmıştır.

Elektronik komponentler, yine proje amaçları doğrultusunda basit ve minimum çeşitlilikle kullanılmış, kontrolcü ve servo sürücüsü tek bir kart olarak tedarik edilmiştir. Kaşlarda 4, gözlerde 6 ve ağız bölgesinde 14 olmak üzere 24 adet konum kontrollü servo motor kullanılmış, bunların 20 adedi yalnızca hareket sağlayacağından MG95S mikro servo motor, kalan 4 adedi ise çene bölgesinin yükünü taşıyacağından görece daha güçlü MG996 servo motor olarak seçilmiştir. Montajı tamamlanan robot surat, insansı yüz mimiklerini gerçekleştirecek şekilde, servo motor sürücüsünün yazılımı ile programlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Öncelikle robot kelimesinin anlamı incelenmelidir. Nitekim her makine, bir robot değildir. Robot, daha önceden istenen görevleri yerine getirecek şekilde programlanmış ya da otonom şekilde çalışan elektromekanik makinelerdir. Çeşitli sensörler ile etrafı algılar, veri toplar ve bu verilere göre görevlerini yerine getirirler. İnsansı robotlar, şekil ve görev bakımından insana benzeyen ve gün geçtikçe bu benzerliğin daha da artırıldığı robot türleridir. Bu robotlar insan vücudunun hareket ve becerilerini taklit etmek üzere tasarlanmaktadır.

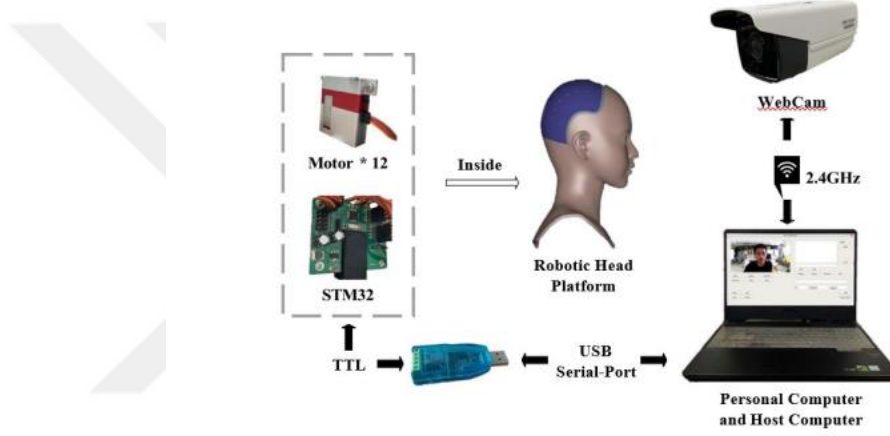
Bu alanda öncü firmalardan biri olan Hanson Robotics 'in Albert HUBO isimli robotu yürüme, koşma gibi insani hareketleri gerçekleştirirken gerçekçi yüz mimikleri ile insansı robotlar arasında öne çıkmaktadır (Oh, Hanson, Kim, 2006). Hanson Robotics firmasının ürettiği Albert HUBO adlı robot, Şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Hanson Robotics Firmasının Ürettiği Albert HUBO (Oh ve diğerleri, 2006).

Geçmişten günümüze insansı robot yüz ile ilgili çalışmalar incelendiğinde her bir çalışmanın, çok farklı odak noktaları olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları, görüntü işleme teknolojisi ile kamera tarafından analiz edilen insan hareketlerini taklit etmek üzere tasarlanan robotlardır (Chen, Yizhou ve Liu, Xiaofeng ve Li, Jie ve Zhang,

Tingting ve Cangelosi, Angelo, 2021). Kamera, derin öğrenme algoritmalarının çalıştırıldığı bilgisayar yardımıyla karşısındaki insanın hareketlerini algılar ve belirli referans noktaları yardımıyla bir sanal iskelet oluşturur. Bu referans noktalarının kameradaki yer değiştirmelerini analiz eden derin öğrenme yazılımı, aynı koordinat değişikliklerini inceleyerek insansı robota taklit etme yeteneği kazandırır. Buradaki en önemli konu, kameranın referans noktalarını net algılayabilmesi için uygun ışık ve koşullara sahip bir kayıt ortamının gerekliliğidir. Bahsedilen çalışmaya ait donanım şeması, Şekil 2. 'de gösterilmiştir.

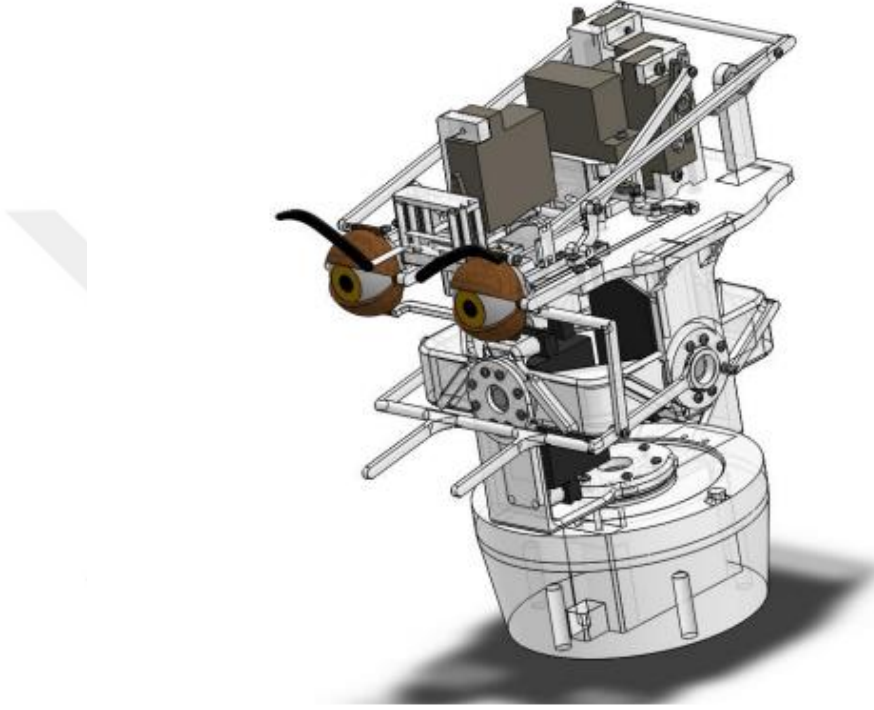


Şekil 2. İnsan Hareketlerini Algılayan ve Simüle Edebilen Bir Tasarımın Donanım Şeması (Chen ve diğerleri, 2021).

Kimi çalışmalar, robotun kendisinden çok, yüz tanıma teknolojisine yönelik çalışmalardır ve bu çalışmaların amacı, robot suratlar üzerinde kullanılabilme amacıdır (Ishihara, Hisashi ve Ota, Nobuyuki ve Asada, Minoru, 2017). Bu ve benzeri çalışmalarda ise amaç, bir önceki çalışmada anlatılan referans noktaları için verimli bölgeleri bulmak ve daha iyi veriler elde etmektir. Daha iyi veri, daha doğru konum bilgisi ve daha başarılı taklit yeteneği demektir.

Çalışmaların bir diğer boyutu ise mekanizma tasarımlarıdır. Yüz kaslarını simüle edebilecek mekanizma ve yöntemler üzerine çalışma yapılmasının amacı, görüntü işleme teknolojisi ile elde edilen verileri simüle edecek robotları geliştirmektir. Bu tip

çalışmalarda, iki tip odak noktaları mevcuttur. Bunlardan biri, basit ve büyük hareket grubu üzerinde çalışılan ve örneğin ağız bölgesini yalnızca çene aç-kapa hareketi ile simüle eden çalışmalardır (Rusu, Dan-Mihai ve Elena, Biris, 2020). Bu çalışmalara örnek olarak Fitzpatrick 'in robot çalışması, Şekil 3. 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Robert Fitzpatrick 'in Yüz Takip Sistemi ile Çalışan Animatronik Robot Suratın Mekanik Tasarımı (Fitzpatrick, 2010).

Bir diğer çalışma türü ise detaylı mimik hareketlerinin simülasyonu üzerine çalışılan, yüz kaslarındaki ufak hareketleri simüle edebilecek kadar detaylı çözümler üretmeyi amaçlayan araştırmalardır.

İlk bahsettiğimiz basit çalışmalar, genel olarak farklı materyallerden mekanizma tasarımları içermektedir ancak daha detaylı olan çalışmalar için farklı altyapılar söz konusudur. Bu altyapılar, mekanizmalar ile kas hareketi simülasyonu ve kablo sistemi ile kas hareketi simülasyonu şeklinde ayrıştırılabilir. Her iki sistemin de avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Tüm bu çalışmaların amacı, tasarım anlamında insana yaklaşan robotlar ile gelecekte insanların yaptığı işleri yapacak, özellikle hizmet sektörleri için tasarlanmış robotlara sahip olabilmektir.

Bu projede üretilen insansı mimiklere sahip animatronik robot, çeşitli sınırlar belirlenerek tasarlanmıştır. Bu sınırlamalar şu şekildedir;

- Kaşlar iki serbestlik dereceli şekilde dış eklem kısmı dikey, iç eklem kısmı ise eğimli şekilde tasarlanmıştır.
- Göz, 4 farklı hareket gerçekleştirmektedir. Bunlar yukarı, aşağı, sağ ve sol şeklindedir.
- Göz kapağı, kapanma ve açılma hareketini gerçekleştirmektedir.
- Ağız bölümünde çene ve dudak, ayrı şekilde incelenmiştir. Çene, açılma ve kapanma hareketi yaparken öne ve geriye serbestliği verilerek mekanizmada esneklik oluşturulmuştur. Dudak kısmında ise sekiz farklı eklem noktası belirlenmiştir. Bunlardan üçü alt, üçü üst, ikisi de ağız kenarı kısımlarındadır.

Bu sınırlar çerçevesinde tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiş, ihtiyaçlara göre standartlaştırılmış mekanizmalar üzerinde revizyonlar yapılmış ya da yeni tasarımlar oluşturulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

İnsansı robot surat genel manada üç ana bölümden oluşmaktadır. Kaş bölgesi, göz bölgesi ve ağız bölgesi olarak sınıflandırdığımız bu üç yapı ayrı ayrı incelenmiş ve tasarlanmıştır.

3.1. Kaş Bölgesi

Kaşlar, duygu durumlarını ifade etme biçimlerimizde büyük rol oynamaktadır. Her ne kadar yapı gereği diğer bölümlerden daha basit olsa da mimikler açısından en dikkat çeken bölgelerden biridir.

Tasarımsal açıdan inceleyecek olursak temel anlamda iki ayrı eklem bölgesi bulunmaktadır. Şekil 5. 'de basit anlamda aşağı yönlü (kızgın), nötr ve yukarı yönlü (şaşkın) kaş durumları gösterilmiştir.



Şekil 5. Kaşın Temel Konumları (Fitzpatrick, 2010).

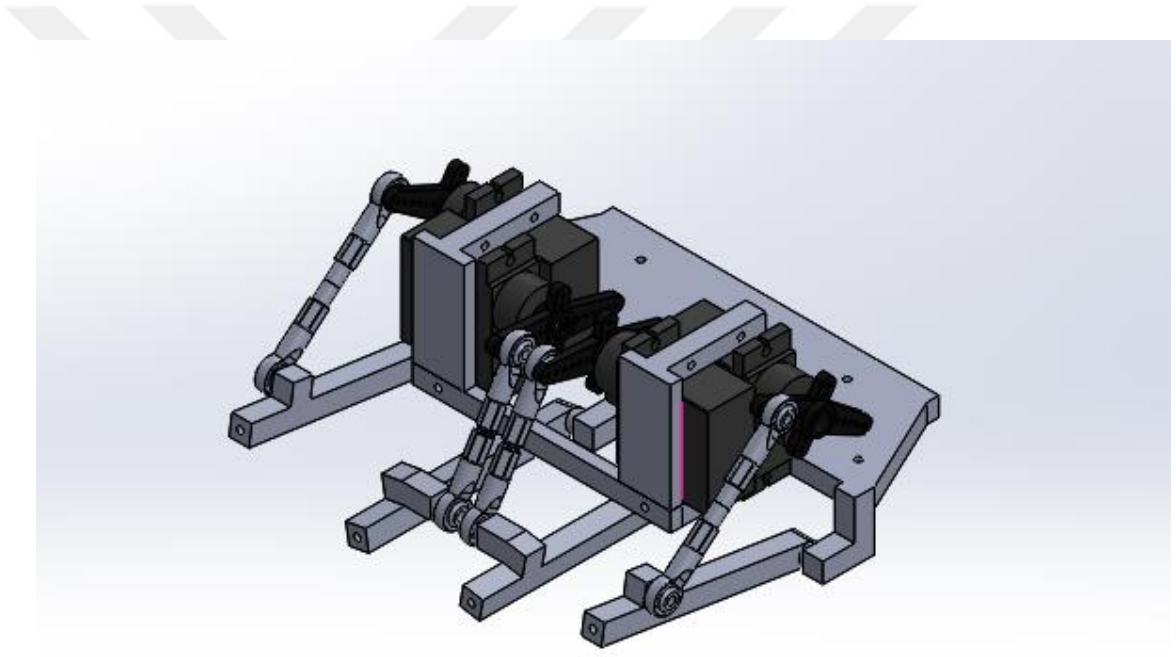
Yukarıda gösterildiği gibi kaşların iç tarafta kalan noktaları yaklaşık olarak 10° 'lik bir açı ile hareket etmektedir. Dışta kalan kısımlar ana hareketten çok dengeleyici harekete sahiptirler ve dikey olarak hareket ettikleri varsayılmıştır.

3.1.1. Kaş Mekanizmasının Tasarımı

İnsan suratına orantısı ve gerçekçi boyutlar göz önüne alınarak çıkartılan hareket şemasını gerçekleştirebilecek bir mekanizma tasarlanmıştır. Seçilen hobi servoların

boyutlarının küçüklüğünün de yeterli olması ile gerçekçilikten şaşmadan servo motorların kafa içerisine yerleşimi gerçekleştirilmiştir.

Mekanizmanın üstündeki alana zıt yönlerde ve arkalı önlü yerleştirilen servo motorlardan kafanın içine bakanlar kaşların iç kısımlarını, dışına bakanlar ise dış kısımlarını hareket ettirmek üzere konumlandırılmıştır. Kaşların iç noktaları daha önce gözlemlendiği ve açıklandığı şekilde 10° 'lik bir açı ile yukarı aşağı hareket ederler. Dış tarafta kalan hareket noktaları ise dikey olarak aşağı yukarı hareket ederek asıl duygu durumunu belirten iç hareket noktalarını dengeleyici görev üstlenirler. Kaş mekanizmasının izometrik görüntüsü Şekil 6. 'da gösterilmiştir.

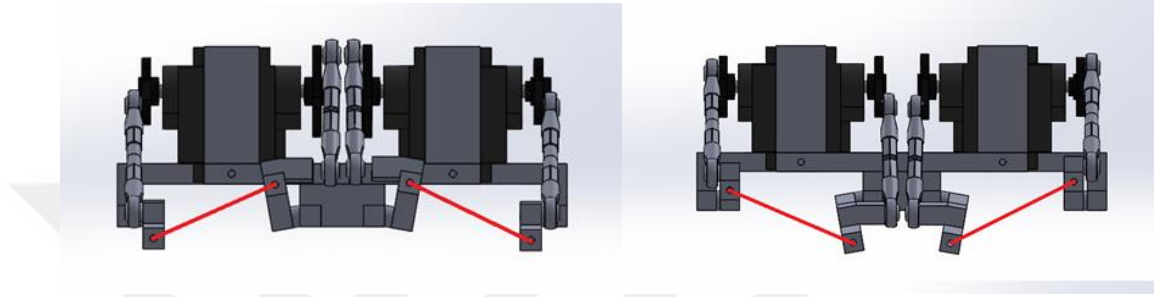


Şekil 6. Kaş Mekanizmasının İzometrik Görünüşü

Burada kullanılan balık gözü mafsallar bulunmadığından mekanizmaya özel ölçülerde yeniden tasarlanıp üç boyutlu yazıcı ile PLA malzemedan üretildi. PLA malzeme seçimindeki en büyük etken ise ABS malzemeye göre daha kolay basılması ve daha az çarpılma yaşanmasıdır.

3.1.2. Kaş Mekanizmasının Hareket Şeması

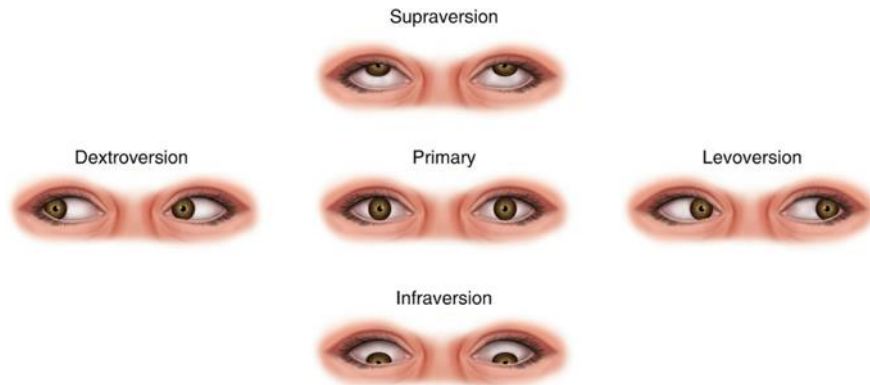
Kaş mekanizması, daha önce de belirtildiği üzere az açılı iç eklem ve dikey hareket ile destekleyici dış eklemden oluşur. İç eklem açısı yaklaşık olarak 10° olarak kabul edilmiş ve buna göre tasarım gerçekleştirilmiştir. Kaş mekanizmasının tasarlanan hareket menzili Şekil 7. 'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Kaş Mekanizmasının Hareket Menzili

3.2. Göz Bölgesi

Gözler, özellikle iletişimde kaşlarla birlikte önemli bir role sahiptir. İnsanlardaki etkili iletişime bakıldığında göz temasının önemi büyüktür ve sözsüz iletişimde dahi kaş ve göz mimiklerinin birlikte kullanılması insanın kendini ifade etmesine fazlasıyla yardımcı olmaktadır. Gözün hareketleri Şekil 8. 'de incelenmiştir.

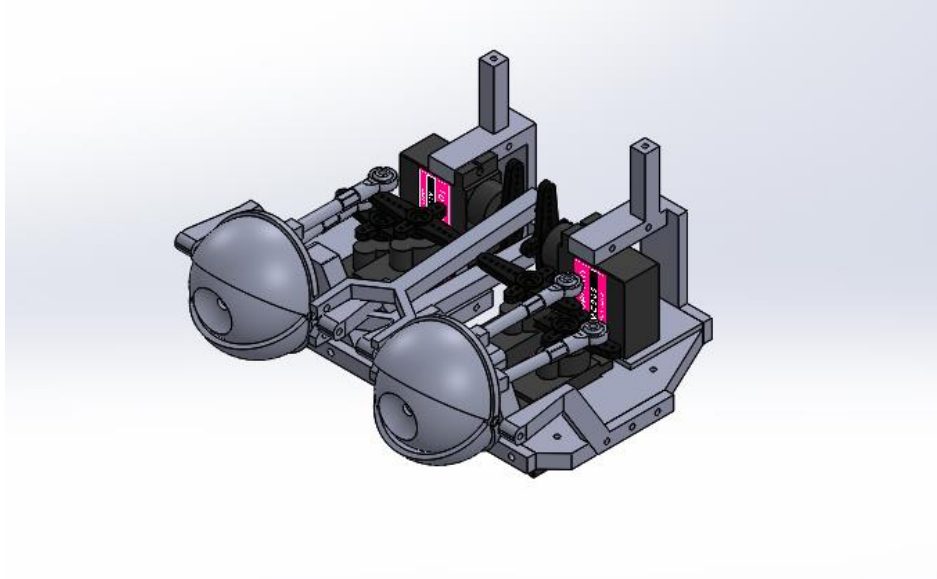


Şekil 8. Gözlerin Hareketleri

Göz mekanizması projedeki komplike mekanizmalardan biridir. Daha öncesinde çeşitli mekanizma tasarımları yapılmış olsa da hepsinin yalnızca estetik farkları bulunduğu ve temel olarak hareket tasarımlarının benzer özellikte olduğu görülmüştür. Araştırmalar doğrultusunda standartlaştırılmış bir göz mekanizması olan Nilheim Mechatronics'in mekanizması üzerinde çalışılmış ve bağımsız göz kapakları kullanımına uyarlanacak şekilde revize edilmiştir.

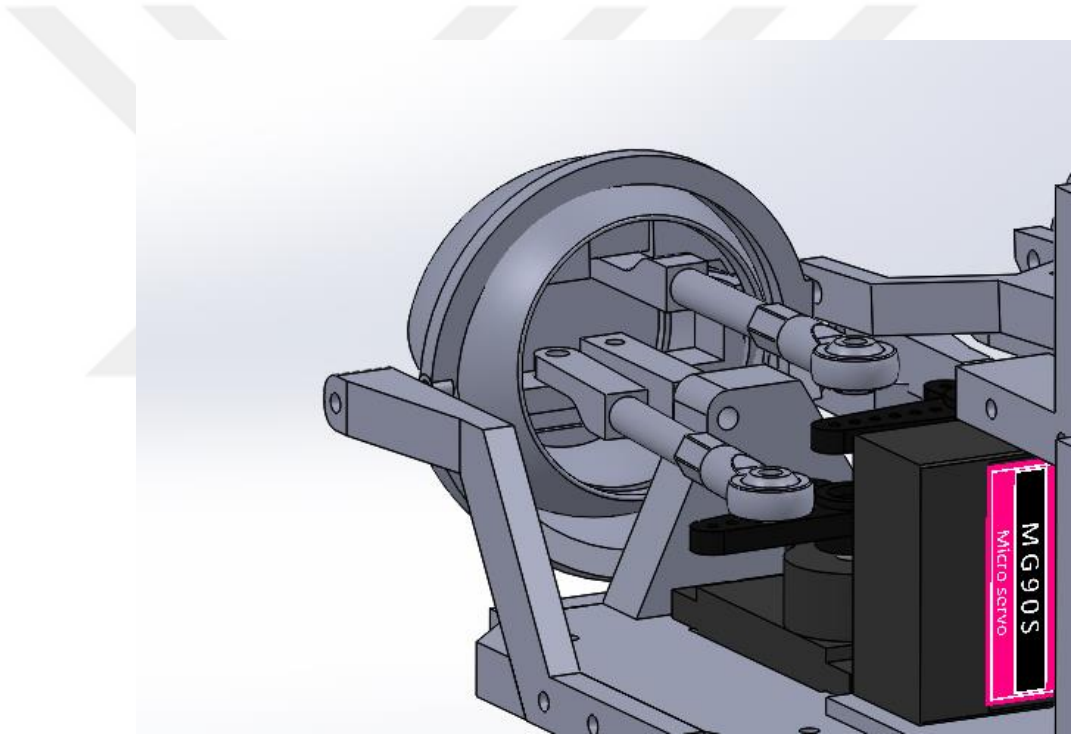
3.2.1. Göz Mekanizmasının Tasarımı

Bu mekanizmada gözlerin hareketi için 4, göz kapaklarının hareketi için 4 servo motor kullanılmış ve bunlar gözlerin hemen arkasında konumlandırılmıştır. Sağ ve sol hareket için birer, yukarı ve aşağı hareketi için de birer olmak üzere motorlar göz arkasına yatay yerleştirilmiştir. Bunların arkasına dikey olarak her bir göz kapağı için birer tane olmak üzere 4 adet motor yerleştirilmesi hedeflenmiş ancak gerçekçi boyutlarda kalınmak istendiğinde yeterli alan sağlanamadığı için üst ve alt göz kapakları için birer adet hareket kolu kullanılmıştır.. Göz ve kaş mekanizmalarını birbirlerine bağlamak adına göz mekanizmasının dört farklı köşesinden bağlantı parçaları monte edilmiş ve iki mekanizma birbirine bağlanmıştır. Şekil 9. 'da göz mekanizmasının genel detaylarına yer verilmiştir.



Şekil 9. Göz Mekanizmasının İzometrik Görünüşü

Göz kürelerinin sağ, sol, yukarı ve aşağı hareketleri için Nilheim Mechatronics 'in (Cogley, 2019) mekanizması ile çalışılmış, ancak balık gözü mafsalların bulunabilirlik sorunları nedeniyle bu mekanizma parçaları mafsallı olarak mekanizmaya özel ölçülerle yeniden tasarlanmış ve üç boyutlu yazıcıda PLA malzemesi ile üretilmiştir. Orijinal tasarım yalnızca göz mekanizması odaklı olduğundan gövde parçaları üzerinde de tasarımsal düzenlemeler yapılarak, ağız ve kaş mekanizmaları ile montaj imkanı sunan bir tasarım ortaya koyulmuştur. Göz kürelerinin hareketinde kullanılan mekanizma ve yeniden tasarlanan mafsallar Şekil 10. 'da gösterilmiştir. Şekilde de görüleceği üzere mekanizma tasarımı standart anlamda estetiğe ve işlevselliğe özen gösterilerek ve gerekli ölçülerde mafsallar üretilerek sağlıklı çalışacak kondisyona getirilmiştir.



Şekil 10. Göz Kürelerinin Hareket Mekanizması ve Mafsallı Bağlantı Parçaları

Şekilde de görüldüğü üzere aşağıda kalan motor, göz küresinin sağ ve sol hareket tahriğini sağlarken, yukarıda kalan motor, yukarı ve aşağı hareketini kontrol etmektedir. Motor olarak MG90S model koduna sahip mini hobi servoları kullanılmıştır. Bunun nedeni, projede motor gücüne çok ihtiyaç olmaması, tasarım ve belirli hareketleri gerçekleştirmeye odaklanılmasıdır. Bu nedenle hobi servolarının tork değeri yeterli seviyededir.

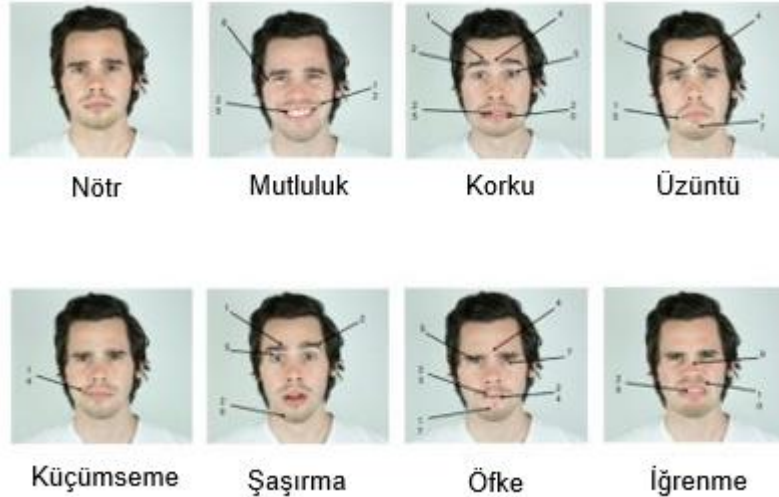
Bu mekanizmaların arkasında konumlandırılan iki adet servo motor, ara bağlantı parçaları ile göz kapaklarına montajlanmıştır. Bu motorlardan biri, üst iki göz kapağının, diğeri ise alt iki göz kapağının açılma ve kapanmasında görev alır.

3.3. Ağız Bölgesi

Her ne kadar dudak ve çene mekanizmaları ayrı ele alınan ve ayrı tasarlanan mekanizmalar olsa da çalışması ve insan fizyolojisi anlamında birlikte değerlendirilmesi gereken mekanizmalardır. Çoğu mimik hareketinde bu iki mekanizmanın kombine hareketi söz konusudur.

3.3.1. Dudakların Hareket Analizi

Dudaklar, duygu durumlarının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir. İnsanların karşısındaki kişinin ne düşündüğünü ya da hangi duygu içerisinde olduğunu anlamak için baktıkları ilk bölgelerdendir. Bu nedenle bu proje için önemli bir yere sahiptir. Dudakların hareket analizi Şekil 11. 'de gerçekleştirilmiştir.

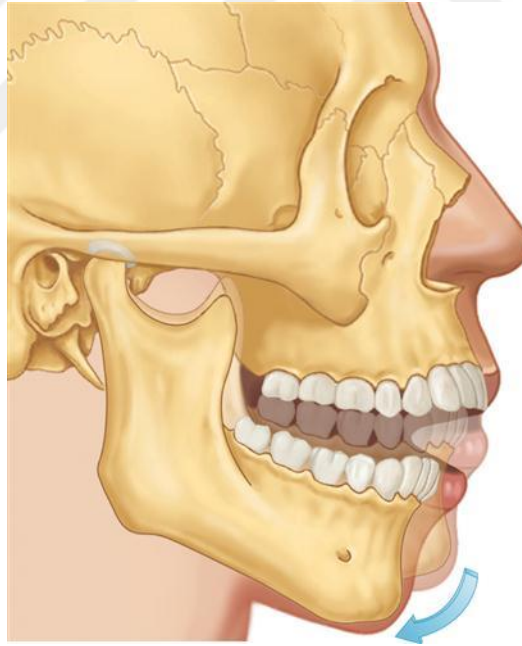


Şekil 11. Farklı Duygu Durumlarında Dudak Hareketlerinin İncelenmesi

Yukarıda da görüldüğü gibi dudak bölgesinde 8 farklı hareket noktası bulunmaktadır. Daha az hareket noktası ile de belirli simülasyonlar gerçekleştirilebiliyor olsa da bu projede gerçeğe yaklaşmak adına bu 8 hareket noktası seçilmiş ve buna göre tasarım yapılmıştır.

3.3.2. Çenenin Hareket Analizi

Çene, dudaklar ile senkron çalışması gereken bir bölgedir ve birlikte hareketleri pekiştirmektedirler. Çene temel olarak konuşma, çiğneme vb işlevlerde rol alır ve tüm bu görevler sırasında belirgin şekilde yukarı ve aşağı, daha az belirgin ancak destekleyici şekilde ileri geri hareketlerini gerçekleştirir. Bu hareketler sırasında dişlerin arkasından mesnetli bir hareket yapısına sahiptir. İnsan çenesinin hareket analizi Şekil 12. 'de gerçekleştirilmiştir.



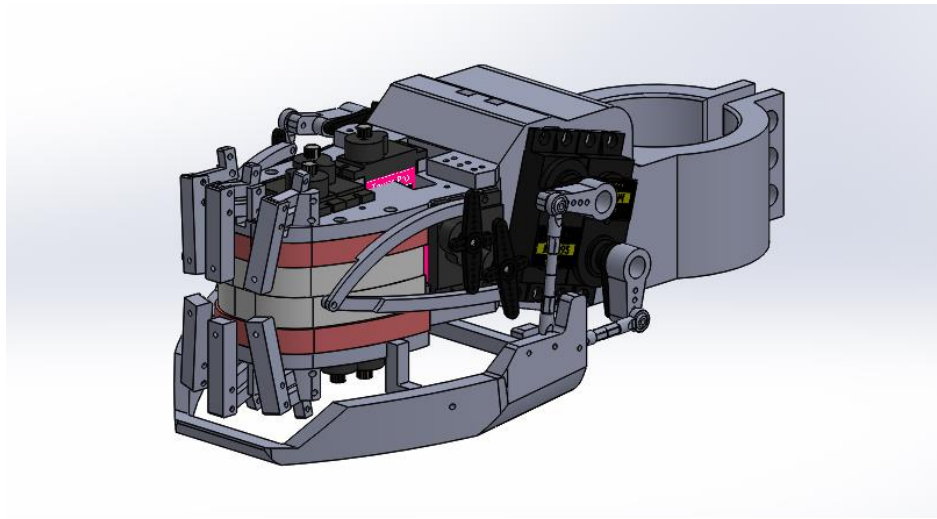
Şekil 12. Çene Eklemi Hareket Analizi

Yukarıda görüldüğü gibi çene, aşağı ve yukarı hareketini diş arkasından mesnetli şekilde gerçekleştirir. İleri ve geri hareketi bu hareketi desteklemek ve esneklik açısından gerçekleştirilir. Sağa ve sola hareketi günlük hayatta çok sık kullanılmadığı için mekanizmanın karmaşıklığını azaltmak adına ihmal edilmiştir.

3.3.3. Çene ve Dudak Mekanizmasının Tasarımı

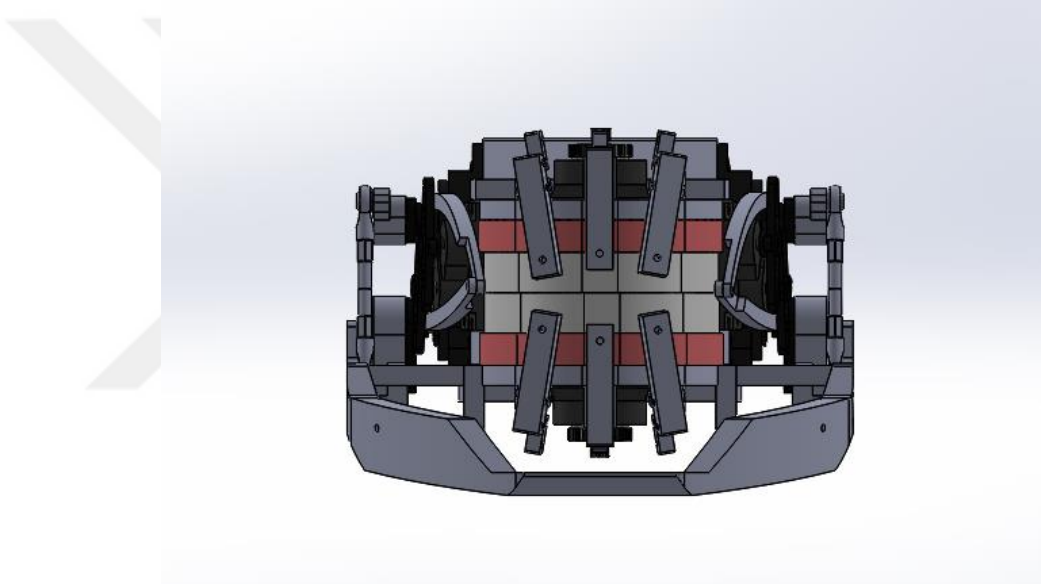
Dudak mekanizmasında daha önce de belirtilen hareket noktaları için gerekli olan tasarım yapılmıştır. Buna göre dudanın üst ve altındaki hareket noktalarına birer motor atanmıştır. İki yanda bulunan ve dudak ile yanağın birleşim noktası olarak duygu durumlarında önemli bir rol alan hareket noktaları için ise ikişer motor kullanılmış ve dudak mekanizmasında toplam 10 adet servo motora yer verilmiştir.

Çene mekanizmasına bakıldığında çene açma, kapama, ileri ve geri olarak dört farklı hareket kabiliyeti bulunması gerekir. Buna uygun gerçekleştirilen tasarımda, hareketin mekanizmaya tek taraflı yük bindirmemesi açısından iki tarafta da motor kullanımı tercih edilmiş, yukarı ve aşağı hareketi için birer, ileri ve geri hareketi için de birer olmak üzere 4 servo motor kullanılmıştır. Ancak bu servo motorlar alt dudak ve alt çeneye ait tüm parçaları taşımakta görev aldıkları için diğer servo motorlara nazaran daha güçlü olan MG995 servo motoru tercih edilmiştir. Bu motorlar boyut olarak geri kalan servo motorlara göre daha büyüktür ancak çene mekanizmasındaki tasarımdan dolayı rahatlıkla kullanılabilir. Çene mekanizmasının arka tarafına yerleştirilen aparat tasarımı sayesinde robot surat üzerinde çalışırken konumlandırma sorunu çözülmüş ve bir stand üzerine sabitlenmiştir. Ağız mekanizmasının genel tasarımı Şekil 13. 'de gösterilmiştir.



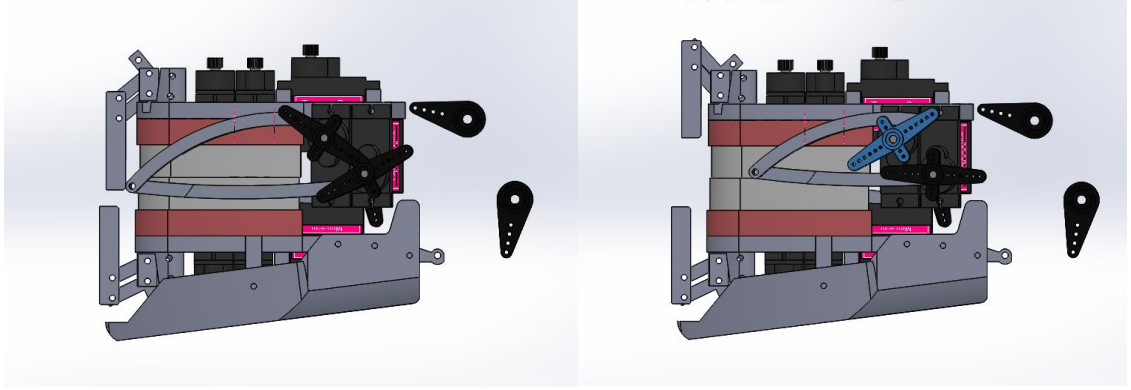
Şekil 13. Ağız Mekanizmasının Genel Tasarımı

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere yanak eklemleri, makas yapılı mekanizma ve bu mekanizmayı kontrol eden iki motor şeklinde tasarlanmıştır. Bu sayede ağız kenarlarının yukarı, aşağı, ileri ve geri hareketleri rahatlıkla simüle edilebilmektedir. Arka tarafta bulunan ve boyut olarak daha büyük olan çene motorları, yukarı-aşağı hareketini sağlayan üst motor ve ileri-geri hareketini sağlayan alt motor olmak üzere iki adettir ancak hareket simetrisi sağlanması ve mekanizmada asimetriklikten kaynaklı zorlanma olmaması adına iki yanda aynı tasarım oluşturulmuş ve toplamda dört adet motor kullanılmıştır. Bu simetrinin daha rahat görüldüğü ağız mekanizmasının önden görünüşü, Şekil 14. 'de gösterilmiştir.



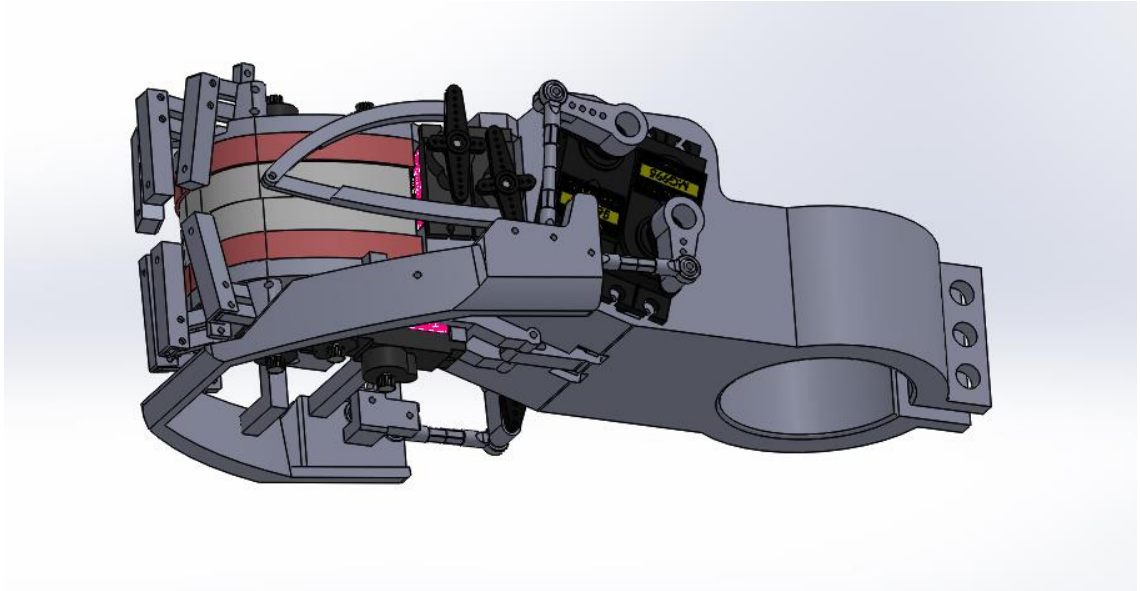
Şekil 14. Ağız Mekanizmasının Önden Görünüşü

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü üzere çene mekanizması ve dudak mekanizması insan anatomisine benzer şekilde simetrik şekilde tasarlanmıştır. Dudak mekanizmaları, birden fazla parçanın kombine hareketiyle hafif eliptik şekilde yukarı ve aşağı hareket dağlar. Yanak mekanizmaları da dudak mekanizmalarına benzer şekilde eliptik bir hareket sergilerler ve dudak mekanizmasından daha serbest harekete sahiptirler. Ancak bu iki mekanizmanın hareket alanı, yani menzilleri sınırlıdır. Dudak ve yanak mekanizmalarının hareket menzilleri, Şekil 15. 'de gösterilmiştir.



Şekil 15. Dudak ve Yanak Mekanizmalarının Hareket Menzilleri

Çenedeki esnekliği sağlamak ve çok kullanılsa da tasarımın hareket kabiliyetini artırmak amacıyla ileri-geri hareketi, slot benzeri bir tasarımla sağlanmış ve çene motorlarıyla kontrol edilecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu sayede çene eklemi sınırlı da olsa gerçeğe yakın hareket kabiliyetine kavuşmuştur. Yukarıda da bahsedilen çenenin mesnetli hareketi bu slot tarafından sağlanmış ve ileri-geri hareketi sırasında mesnet yapısında herhangi bir problem oluşmaması sağlanmıştır. Bu tasarımın detaylı görünümü Şekil 16. 'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Çene Mekanizmasındaki Slotlu Tasarımın Detaylı İncelemesi

Şekilde de görüldüğü gibi, mesnet yapısı dişlerin arkasında kalacak şekilde konumlandırılmış ve arka çene motorlarının yardımıyla ileri-geri hareketini gerçekleştirirken mesnet özelliğinin korunması amaçlanmıştır. Ağız mekanizmasının arkasında yer alan, vida ve somun yardımıyla sıkılığı ayarlanan tasarım, kafayı stand görevi görecektir boruya sabitlemede kullanılmıştır.

3.4. Animatronik Robot Suratın İmalatı

Robot surat tasarımında her mekanizma, şase, motor tutucular, bağlantı kolları gibi farklı tür yapı elemanlarını barındırırlar. Günümüzde imal edilen robotlar farklı materyallerden yapılsa da, bu projenin amaçlarından biri olan düşük maliyet nedeniyle üç boyutlu yazıcı ile plastik baskı yöntemi seçilmiştir. Bu yöntemin hassasiyeti, diğer yöntemlerden daha düşük olabilir ancak genel anlamda mekanizmalar işlevlerini yerine getirebilmekte ve gerçekçi mimikler elde edilebilmektedir.

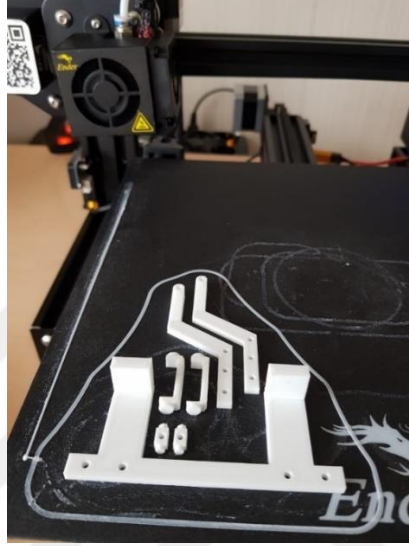
3.4.1. Animatronik Robot Suratın Mekanizmalarının İmalatı

Mekanizma tasarımları gerçekleştirildikten sonra bu tasarım dosyaları, STL formatına getirilerek üç boyutlu yazıcılara yüklenmiş ve PLA malzemeden üretimleri gerçekleştirilmiştir. Mekanizmaların üretimine ait bazı görseller Şekil 17. , Şekil 18. ve Şekil 19. 'da gösterilmiştir.



Şekil 17. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Mekanizmasının Tabanının Basımı

Yukarıdaki görselde baskının iç yapısı gözlemlenebilmektedir. Baskılar, %20 doluluk oranı ve dinamik baskı kalitesi olarak geçen 0,16 mm baskı kalitesinde alınmıştır. Destek malzemesi seçeneği açık olarak ayarlanmış ve yüzeyle temas etmeyen bölgeler, destek malzemesi ile düzgün şekilde basılabilmektedir. Bu kısımlar, baskı sonrası temizlenerek mekanizmalar kullanıma hazır hale getirilebilmektedir.



Şekil 18. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Mekanizmasının Motor Tutucularının Basımı



Şekil 19. Üç Boyutlu Yazıcıda Göz Kürelerinin Mekanizmasının Basımı

Yukarıda örnekleri verilmiş olan baskı aşamaları, elektronik ve dişler dışarısındaki tüm malzemeler için aynı şekilde gerçekleşmiştir.

3.4.2. Animatronik Robot Suratı Kullanılan Dişlerin İmalatı

Animatronik robot suratın gerçekçiliğini artırmak için dişler, polimer kil kullanılarak el ile üretilmiştir. Polimer kil, yapısı gereği üzerinde çalışıldıkça yumuşayan bir malzemedir ve istenilen yapı elde edildikten sonra pişirilerek şekli sabitlenir. Dişlerin üretimi tamamlandıktan sonra 120°C 'de 30 dakika boyunca pişirilerek verilen şekil sabitlenmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir. Dişlerin tamamlanmış hali, Şekil 20. 'de gösterilmiştir.

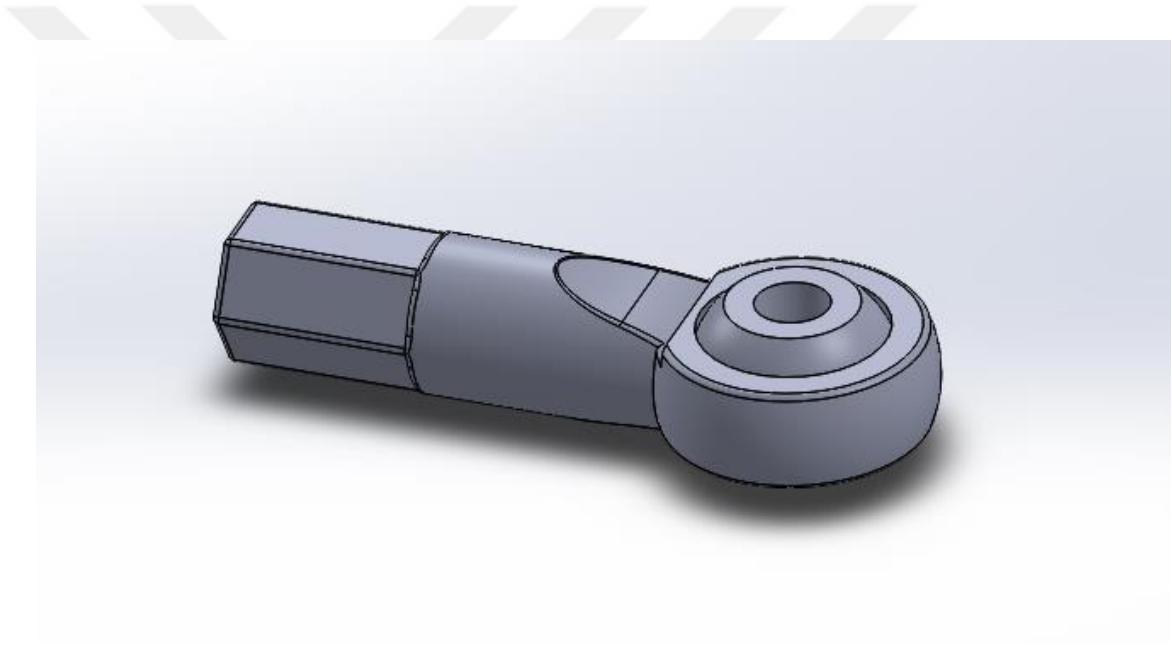


Şekil 20. Polimer Kil ile Üretilen Diş Modeli

3.4.3. Animatronik Robot Suratı Kullanılan Ara Bağlantıların İmalatı

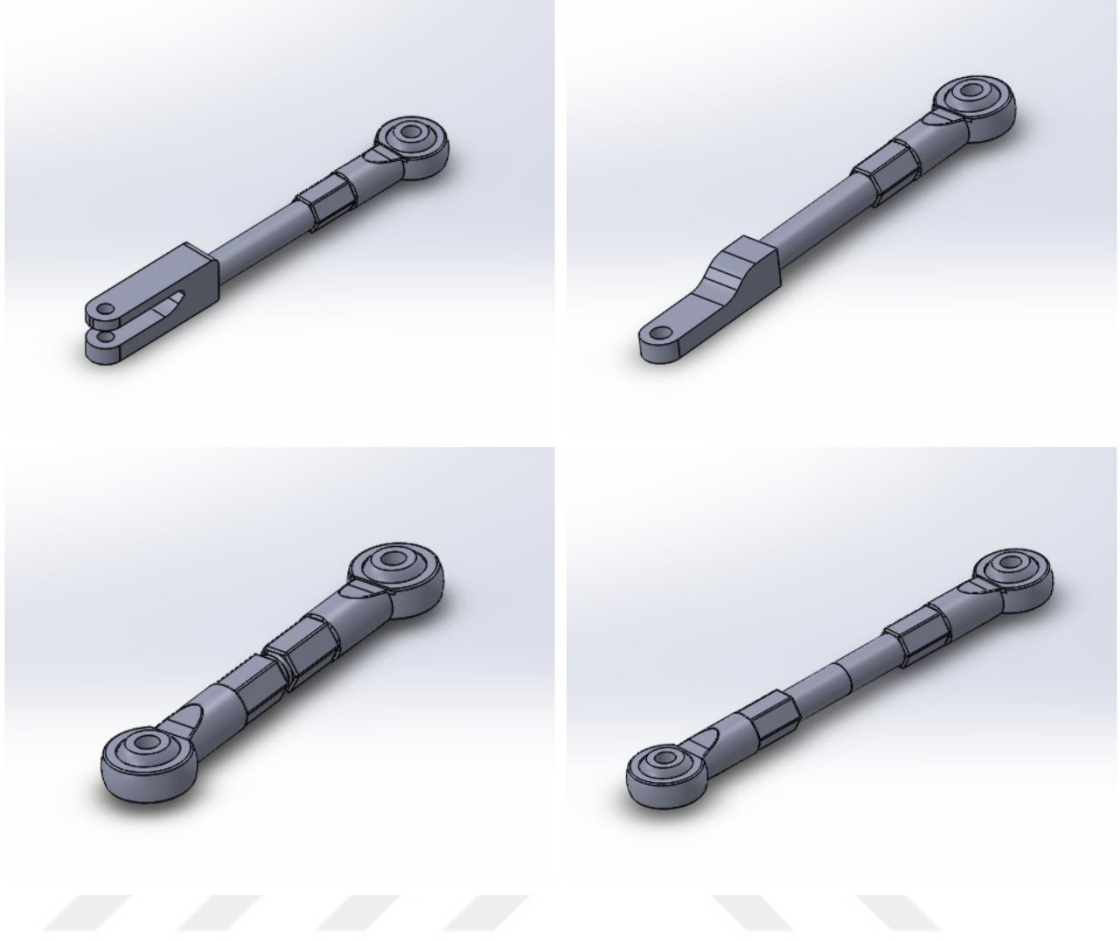
Animatronik robot suratın bir çok bölgesinde küresel mafsaldan elde edilen serbestliğe ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma alanının darlığı nedeniyle bazı mekanizmaların bağlantı noktaları yatayda aynı seviyede ayarlanamayabilir ya da hareket sırasında bu yatay

hizalama bozulabilmektedir. Bu gibi durumlarda parçaların zarar görmemesi ve sağlıklı çalışabilmesi için gereken esneklik ve serbestlik, balık gözü mafsallarla sağlanmıştır. Bu mafsalların ülkemizde bulunurluğu özellikle 2 mm delik çapı için çok mümkün olmamaktadır. Parça ve tedarik maliyetleri de göz önünde bulundurulduğunda bu parçaların bilgisayar ortamında ihtiyaca uygun şekilde yeniden modellenmesi ve üç boyutlu yazıcıda baskı alınarak kullanılması kararlaştırılmıştır. Çalışılan projenin güç ihtiyacından çok mekanizma hareketleri ile belirli senaryoların gerçekleştirilmesi amaçlandığından bu baskılardan yeterli seviyede dayanım elde edilmiştir. Balık gözü mafsalsın bilgisayar ortamında oluşturulan katı model görüntüsü Şekil 21. 'de gösterilmiştir.



Şekil 21. Balık Gözü Mafsalsın Tasarımı

Yukarıda görseli verilen mafsalsın tasarımı, farklı bölgelerdeki kullanım amacına göre revize edilerek baskıları alınmış ve montajı gerçekleştirilmiştir. Bunun başlıca nedeni, balık gözü mafsalda da olduğu gibi bulunabilirliği zor ve tedarik maliyetleri görece yüksek olan vidalı millerdir. Bu nedenle ihtiyaç duyulan ölçü ve şekiller ile düzenlenen tasarım, maliyet avantajı sağlamıştır. Farklı bölgelerde kullanılan mafsalslı bağlantı parçalarının tasarımları, Şekil 22. 'de gösterilmiştir.



Şekil 22. Farklı Bölgelerde Kullanılan Mafsallı Bağlantı Parçalarının Tasarımı

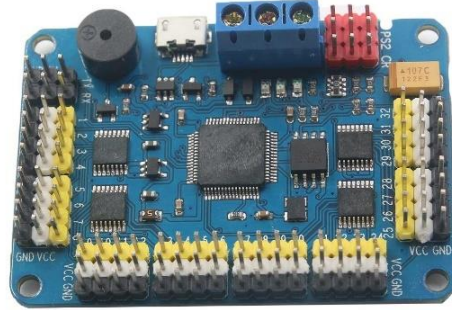
Yukarıda gösterilen mafsallar, sol üst, sağ üst, sol alt, sağ alt şeklinde sırasıyla belirtilen yerlerde kullanılmıştır. Göz sağ-sol bağlantısı, göz yukarı-aşağı bağlantısı, kaş iç bağlantısı ve çene yukarı-aşağı bağlantısı.

3.5. Animatronik Robot Suratın Elektronik Tasarımı

Animatronik robot suratın tasarlanan mekanizmalarını istenilen doğrultuda hareket ettirebilmesi ve çeşitli mimiklerin simüle edilebilmesi için mikro kontrolcü, motor sürücüsü, konum kontrollü servo motorlar, güç kaynağı gibi elektronik komponentlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parçalar birbiri ile uyum içinde çalışılmalı ve motorlara ihtiyaç duyulan güç kontrollü bir şekilde aktarılmalıdır. Aksi takdirde sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturulamamaktadır. Bu bölümde kullanılan komponentler ve özellikleri incelenmiştir.

3.5.1. Mikro Kontrolcü ve Servo Motor Sürücüsü

Mikro kontrolcüler, elektronik tasarımların beyni niteliği taşıyan ve oluşturulan tasarımın kontrolünü sağlayan komponentlerdir. Günümüzde bunlara en yaygın örnekler Arduino ve Raspberry Pi kontrolcü kartlarıdır. Bu kontrolcüler belirli sayılardaki motorları entegre pinleri ile kontrol edebilmektedir. Ancak bu projede ihtiyaç duyulan motor sayısı fazla olduğundan harici bir motor sürücü kartına da ihtiyaç duyulmaktadır. Öncelikli olarak maliyet avantajı göz önünde bulundurulduğunda, kontrolcü ve motor sürücü kartının ayrı ayrı kullanıldığı bir tasarım yerine üzerinde kontrolcü çipi bulunan entegre bir servo motor sürücü kartı kullanılmıştır ve bu kart, 32 adet servo motoru aynı anda kontrol edebilmektedir. Projede kullanılan 32 kanal servo sürücü kartı, Şekil 23. 'de gösterilmiştir.



Şekil 23. 32 Kanal Servo Sürücü Kartı

Yukarıda gösterilen servo sürücü kartı, çeşitli kontrolcülerle kontrol edilebildiği gibi, kendi yazılımı sayesinde başka bir kontrolcüye ihtiyaç duymadan servo motorları kontrol edebilme kabiliyetine sahiptir. Bunun ile birlikte kablosuz uzaktan kontrol özelliğini de barındırmaktadır. Kartın özellikleri, Çizelge 1. 'de verilmiştir.

Çizelge 1. 32 Kanal Servo Sürücü Kartının Özellikleri

32 Kanal Servo Motor Sürücüsü Özellikleri	
Operasyon Voltajı	5V
Servo Motor Giriş Voltajı	4,2V ~ 7,2V (Servo motora bağlı)
CPU	32 bit
Baud Rate (USB)	115200
Baud Rate (Bluetooth, UART)	4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200
Flash Kapasitesi	16M
Servo Kontrol Kapasitesi	32
Maksimum Aksiyon Grupları	256
Kontrol Hassasiyeti	1µs
Servo Motor Sinyal İzolasyonu	Evet
Gösterge Ledi	CPU Güç Gösterge Ledi (Kırmızı) Servo Motor Güç Gösterge Ledi (Yeşil) PS2 Kablosuz Kontrol (Sarı, led kapalı bir servo motor kontrolü, led açık çoklu servo kontrolü)
Boyut	63 mm x 45 mm
Haberleşme Protokolü	UART
Bilgisayar Yazılımı	Windows XP ve sonrası, Mac OS 10.8 ve sonrası, Linux(Kernel 3.0 ve sonrası)
Düşük Basınç Alarmı	Ön Tanımlı Açık
Servo Motor Başlangıç Değeri	Ön Tanımlı 1500
Servo Motor Tip Desteği	9G ~ 55G (3,3V ~ 7,2V)
Çevrimiçi Operasyon Desteği	C51, Arduino, ARM, DSP, Bluetooth, WIFI, Bilgisayar
PS2 Kablosuz Kontrol	Tek Servo Motor Kontrolü Çoklu Servo Motor Kontrolü

3.5.2. Voltaj Regülatörü

Projede kullanılan servo motorlar ve motor sürücüsü, yapısı gereği hassas olduğundan ve entegre yüksek voltaj koruma devreleri olmadığından, güç kaynağı ile aralarına voltaj regülatörü bağlanmıştır. Bu sayede karta ve motorlara gönderilen güç kontrol edilebilmekte ve yüksek voltajdan kaynaklı bir hasarın önüne geçilebilmektedir. Kullanım kolaylığı ve ekstra malzeme ihtiyacı olmaması açısından üzerinde yerleşik

gösterge bulunan bir regülatör seçilmiştir. Kullanılan voltaj regülatörü, Şekil 24. 'de gösterilmiştir.



Şekil 24. Dijital Göstergeli Voltaj Regülatörü

Yukarıda görseli verilen voltaj regülatörü, üzerindeki ayar vidası yardımıyla, üzerinden geçen voltajı ayarlayarak çıkış ucundan ayarlanan voltajı kontrollü bir şekilde devreye iletmektedir. Voltaj regülatörünün özellikleri, Çizelge 2. 'de verilmiştir.

Çizelge 2. Dijital Göstergeli Voltaj Regülatörünün Özellikleri

Voltaj Regülatörü Özellikleri	
Giriş Gerilimi	4-35V
Çıkış Gerilimi	1,25-30V
Çıkış Akımı	3A
Kart Ölçüleri	68 mm x 35 mm
Gerilim Okunması	7 Segment

3.5.3. Servo Motorlar

Animatronik robot surat tasarlanırken iki tip servo motor kullanılması kararlaştırılmıştır. Bunlardan biri, yük taşımak yerine gerekli hareketi sağlayacak ve boyut olarak

gerçekçiliği korumak amacıyla küçük olması gereken MG90S mikro servoları, diğeri ise alt çene mekanizmasını taşıyacak ve görece daha fazla güce ihtiyaç duyacak olan MG995 servo motorlarıdır.

3.5.3.1. MG90S Mikro Servo Motor

Boyutu ve maliyet avantajı ile projede sayıca en çok ihtiyaç duyulan servo motorlardır. MG90 mikro servolar yerine MG90S mikro servoların seçilme nedeni metal dişli olmasıdır. Bu sayede yeterli dayanıklılık elde edilmiştir. Servo motor, Şekil 25. 'de gösterilmiştir. Uygun fiyat ve metal dişli takımının dayanıklılığıyla projeye uygun olan servo motorun özellikleri Çizelge 3. 'de verilmiştir.



Şekil 25. MG90S Mikro Servo Motor

Çizelge 3. MG90S Mikro Servo Motorun Özellikleri

MG90S Mikro Servo Motor Özellikleri	
Ağırlık	12gr
Hız	4,8V ve 0,10sn/60 derece; 6,0V ve 0,09sec/60 derece
Tork	4,8V & 1,6KG-cm; 6,0V & 1,8kg-cm
Gerilim	4,8V~6,0V
Kablo Uzunluğu	250 mm
Boyut	22,6 mm x 12,1 mm x 22,5 mm
Ölü Bant Genişliği	5 µs
Arayüz Özellikleri	JR / FP Genel

3.5.3.2. MG995 Servo Motor

Çenede kullanılacak motorların alan anlamında daha serbest olması ve alt çene mekanizmasının ağırlığını taşıyacak olması nedeniyle daha güçlü bir servo motor ihtiyacı doğmuştur. Bu doğrultuda yine metal dişlileriyle dayanıklı ve maliyet olarak optimum seviyede olan MG995 servo motorlar seçilmiştir. Servo motor, Şekil 26. 'da gösterilmiştir.



Şekil 26. MG995 Servo Motor

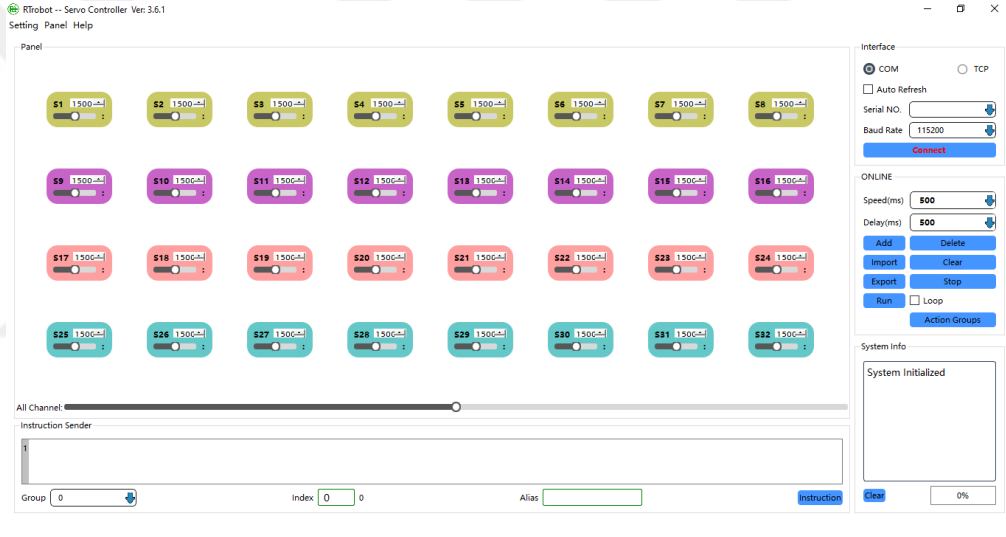
Seçilen servo motorun teknik özellikleri, Çizelge 4 'de verilmiştir.

Çizelge 4. MG995 Servo Motorun Özellikleri

MG995 Servo Motor Özellikleri	
Modülasyon	Analog
Tork: 4,8V	4,8V: 138,9 oz-inç (10,00 kg-cm)
Hız: 4,8V	4,8V: 0,20 sn / 60 °
Ağırlık	1,94 oz (55,0 g)
Boyutlar	1,60 inç (40,6 mm)
Genişlik	0,78 inç (19,8 mm)
Yükseklik	1,69 inç (42,9 mm)
Motor Tipi	Çekirdeksiz
Dişli Tipi	Son Dişli Metal, İç Dişliler Plastik
Dönme / Destek	İkili Rulmanlar
Dönme Aralığı	180 °
Darbe Döngüsü	20 ms
Darbe Genişliği	1000-2000 µs
Soket Tipi	JR

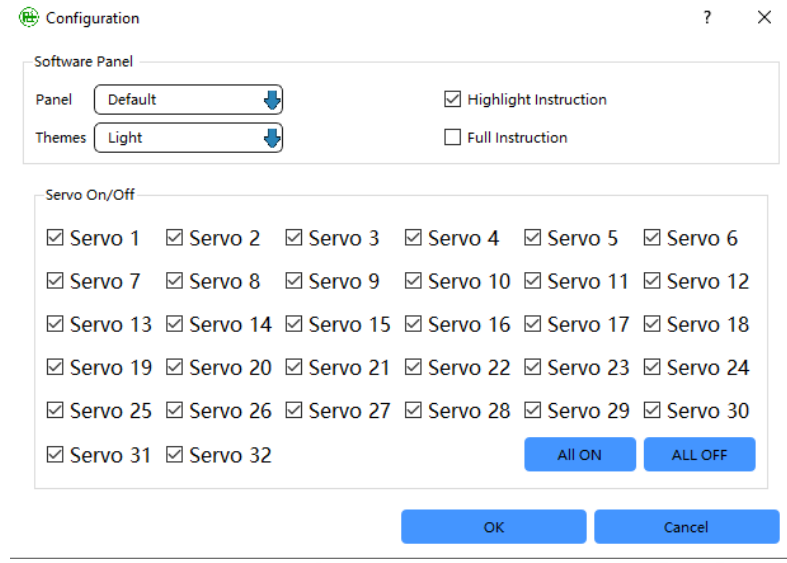
3.6. Animatronik Robot Suratın Yazılımı

Animatronik robot suratında kullanılan kontrolcü kartı, daha önce özelliklerinde belirtildiği gibi arduino, bilgisayar, kablosuz kontrolcü gibi farklı kontrol program ve ekipmanlarıyla kontrol edilebilmektedir. Ancak bu projede kartla uyumlu olması ve kullanım kolaylığı açısından kontrolcü kartın kendi yazılımının kullanımı tercih edilmiştir. Bu yazılım, işletim sistemleri açısından Windows, Mac OS ve Linux işletim sistemlerini desteklemekte olup, evrensel bir kullanıma sahiptir. Bu nedenle projenin uygulama ve kullanım kapsamını kısıtlamamaktadır. Kontrolcü kart yazılımının genel arayüz görüntüsü, Şekil 27 'de gösterilmiştir.



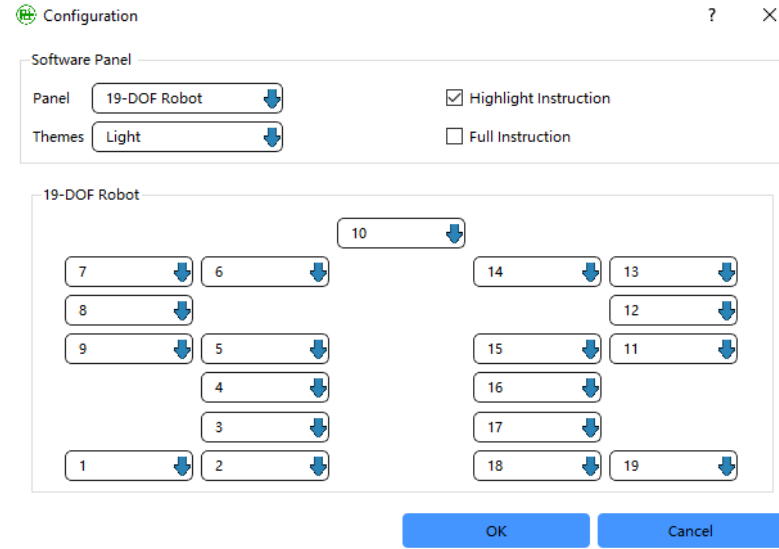
Şekil 27. Kontrolcü Kart Yazılımının Arayüzü

Yukarıda gösterilen arayüzde çok sayıda kişiselleştirme seçenekleri sunulmuştur. Servolara farklı renkler ve isimler atanabilir, yerleri sürükleyip bırakarak değiştirilebilir ve kişisel olarak farklı diyagram şekilleri oluşturulabilir. Bunların dışında kullanılmayan servolar ekran üzerinden kaldırılabilir ve ön tanımlı servo modları kullanılabilir. Servo ekle-kaldır ve bir takım özelleştirme alanlarının olduğu arayüz ekranı Şekil 28 'de gösterilmiştir.



Şekil 28. Kontrolcü Kart Yazılımında Özelleştirme Ekranı

Yukarıdaki ekranda da görüldüğü üzere ihtiyaç duyulmayan servolar kapatılarak temiz bir arayüz elde edilir. Panel sekmesinden seçilen farklı ön tanımlı proje biçimleri seçilerek hızlı başlangıçlar yapılabilir. Bu ayara örnek olarak Şekil 29 ‘da 19 DOF Robot projesi için ön tanımlı program arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 29. Kontrolcü Kart Yazılımında 19 DOF Robot Arayüzü

Yukarıda da görüldüğü gibi motorların kontrolünde kolaylık sağlanması amacıyla sürükle-bırak yöntemiyle konuma bağlı tasarım yapılabilir ve herkes tarafından kullanım kolaylığı sağlanabilir.

Yazılım aracılığıyla servolar konum kontrollü şekilde yönetilebilmektedir ancak animatronik robot suratın ihtiyaç duyduğu bir diğer kontrol şartı da birden fazla servo motorun, uyumlu şekilde belirli konumlara gelerek insansı yüz mimiklerini ve duygu durumlarını oluşturabilme kabiliyetidir. Bu ihtiyaca yönelik kontrolcü kart yazılımının sunduğu çözüm, aksiyon grupları seçeneğidir. Bu seçenekte birden fazla servo motorun hangi durumda hangi konumda durması gerektiği ayarlanır ve aksiyon grubu olarak kaydedilir. Bu şekilde çoklu programlama işlemi gerçekleştirilir. Örneğin, üzgün yüz ifadesi durumunda ağız göz ve kaş motorlarının gelmesi gereken konumlar programa tanımlandıktan sonra bu tanımlamalar bir aksiyon grubu olarak kaydedilir ve üzgün olma durumu komutu verildiğinde tüm servo motorlar, önceden belirlenen konumlara giderek üzgün yüz ifadesini gerçekleştirirler. Bu ayarların yapılabildiği ve aksiyon grubunun oluşturulabildiği kontrol paneli, Şekil 30. 'da gösterilmiştir.

Interface

COM TCP

Auto Refresh

Serial NO. COM7

Baud Rate 115200

Connect

ONLINE

Speed(ms) 500

Delay(ms) 500

Add Delete

Import Clear

Export Stop

Run Loop

Action Groups

Şekil 30. Kontrolcü Kart Yazılımında Kontrol Paneli

Program arayüzünde motorların konum ayarları yapıldıktan sonra yukarıdaki panelde motorların hız, gecikme, bağlantı genişliği gibi ayarları yapılmaktadır. Ardından “Action Group” butonuna basılarak bu konular, aksiyon grubu olarak kaydedilir.

3.7. Animatronik Robot Suratın Maliyeti

Animatronik robot suratın hedeflerinden bir diğeri de düşük maliyet kriteridir. Uygun fiyatlı malzemelerle üretilen animatronik robot suratın maliyeti, temel olarak üç ana kısımdan oluşmaktadır. Sarf malzeme, üretim ve elektronik şeklinde sınıflandırabileceğimiz bu maliyetler özellikle üç boyutlu baskı kısmında, irili ufaklı bir çok ara bağlantı elemanı olması nedeniyle bölgesel olarak gruplandırılarak hesaplanmıştır. Üç boyutlu baskılara ait maliyet analiz tablosu Çizelge 5. ‘de verilmiştir.

Çizelge 5. Animatronik Robot Suratın Üç Boyutlu Baskı Maliyetleri

Animatronik Robot Surat Üç Boyutlu Baskı Maliyetleri				
Parça Adı	Baskı Süresi (h)	Filament Miktarı (kg)	Elektrik	Malzeme
Kaş Grubu	6,5	0,027	₺ 0,82	₺ 5,72
Göz Grubu	11,5	0,06	₺ 1,45	₺ 12,72
Ağız Grubu	35,5	0,215	₺ 4,47	₺ 45,58
Bağlantı Aparatları	7	0,025	₺ 0,88	₺ 5,30

Yukarıda maliyet analizi yapılırken, üç boyutlu yazıcının saatlik elektrik tüketimi 0,1 kW, elektrik ücretleri ortalama 1,26 ₺/kW ve 1 kg PLA filament ücreti 212 ₺ olarak kabul edilmiştir. Bu değerler günümüz koşullarındaki ortalama değerlerdir.

Maliyet hesabındaki diğeri kategori, elektronik kategorisidir. Burada da ürünlerin mevcut fiyatları incelenmiş ve maliyet analizi tablosu oluşturulmuştur. Maliyet analizi tablosu, Çizelge 6. ‘da verilmiştir.

Çizelge 6. Animatronik Robot Suratın Elektronik Komponent Maliyetleri

Animatronik Robot Surat Elektronik Komponent Maliyetleri			
Ürün	Adet	Fiyat	Toplam Fiyat
32 Kanal Servo Sürücü Kartı	1	₺ 620,06	₺ 620,06
Dijital Göstergeli Voltaj Regülatörü	1	₺ 61,91	₺ 61,91
MG90S Mikro Servo Motor	20	₺ 55,52	₺ 1.110,40
MG995 Servo Motor	4	₺ 73,96	₺ 295,84
DC-DC Adaptör	1	₺ 70,00	₺ 70,00

Yukarıda verilen fiyatlar, internet ortamındaki ortalama ve KDV dahil ücretlerdir.

Yapılan maliyet analizleri göz önünde bulundurulduğunda kabul edilebilir maliyetlerin hesap edilmesi için, baskı maliyetlerine yaklaşık %15 fire eklenmesi ve günümüzde ülkemizdeki fiyatların hızlı ve yüksek dalgalanması sebebiyle dolar kuru üzerinden hesap edilmesi uygun görülmüştür. Bu gibi durumda animatronik robot suratın maliyeti aşağıdaki gibidir. Baskı maliyeti B , elektronik maliyeti E , toplam maliyet T ve dolar kuru 17 ₺ olarak kabul edilmiştir.

$$T = (B + E) / 17$$

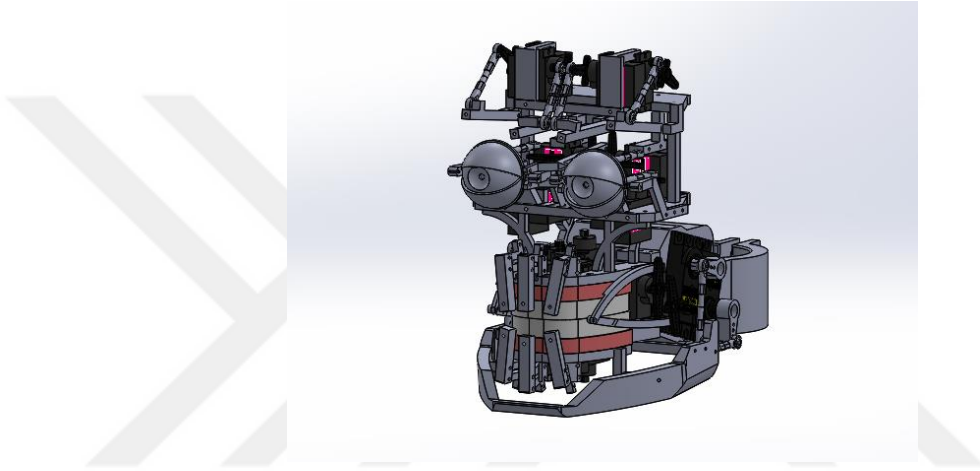
$$T = [1,15(76,95) + 2158,21] / 17$$

$$T = 132,15$$

Yukarıda yapılan hesaplamalarda da görüldüğü gibi baskı maliyetlerine %15 fire eklenip toplam maliyet dolar kuru üzerinden hesaplandığında animatronik robot suratın günümüz koşullarındaki maliyeti 132,15 \$ civarlarındadır.

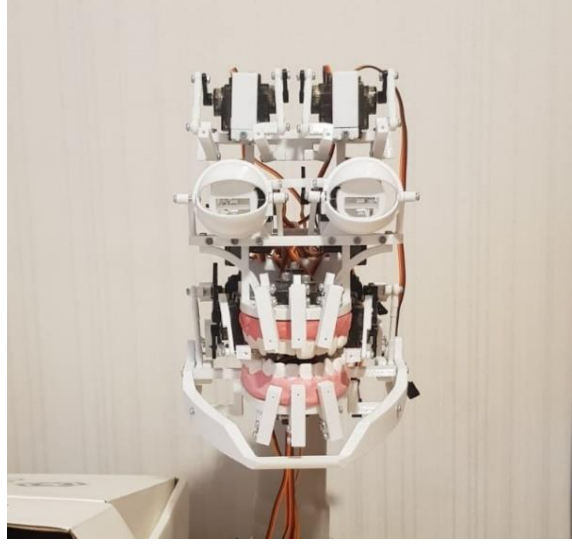
4. BULGULAR

Bu projede, insansı yüz mimiklerine sahip animatronik robot surat üzerine tasarım ve üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Projedeki temel kriter, tasarımda insana yaklaşmak olduğundan boyut kısıtlarıdır. Bu nedenle kullanılmış olan motorlar ve bu motorların hareket ettirdiği mekanizmalar insan kas yapısına uyumlu, benzer konumda benzer işlevleri gerçekleştirmelidir. Animatronik robot suratın bilgisayar ortamında modellemesi, Şekil 31. 'de gösterilmiştir.



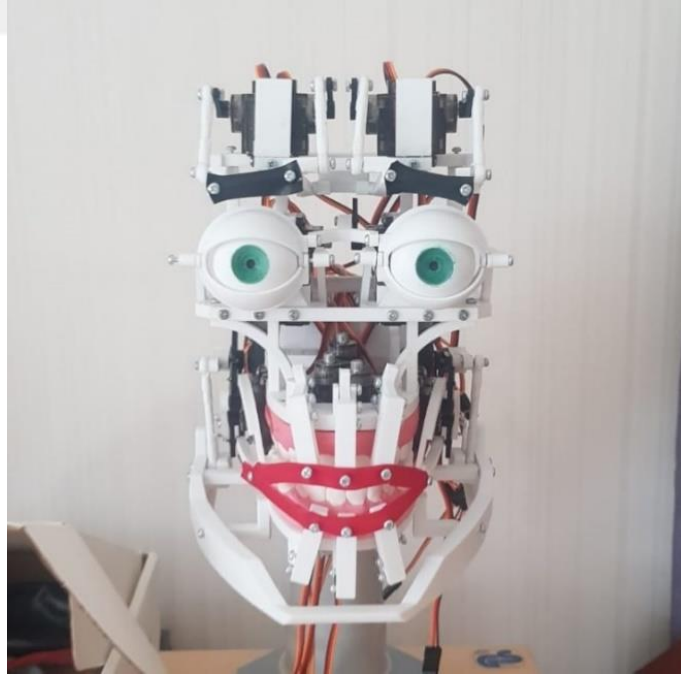
Şekil 31. Animatronik Robot Suratın Bilgisayar Ortamında Modellemesi

Yukarıdaki modellemede de görüleceği üzere, tüm mekanizma grupları boyutsal anlamda birbiriyle uyumlu ve insan benzeri boyutlardadır. Temel mekanizmaların montajlanmış hali, Şekil 32. 'de gösterilmiştir.



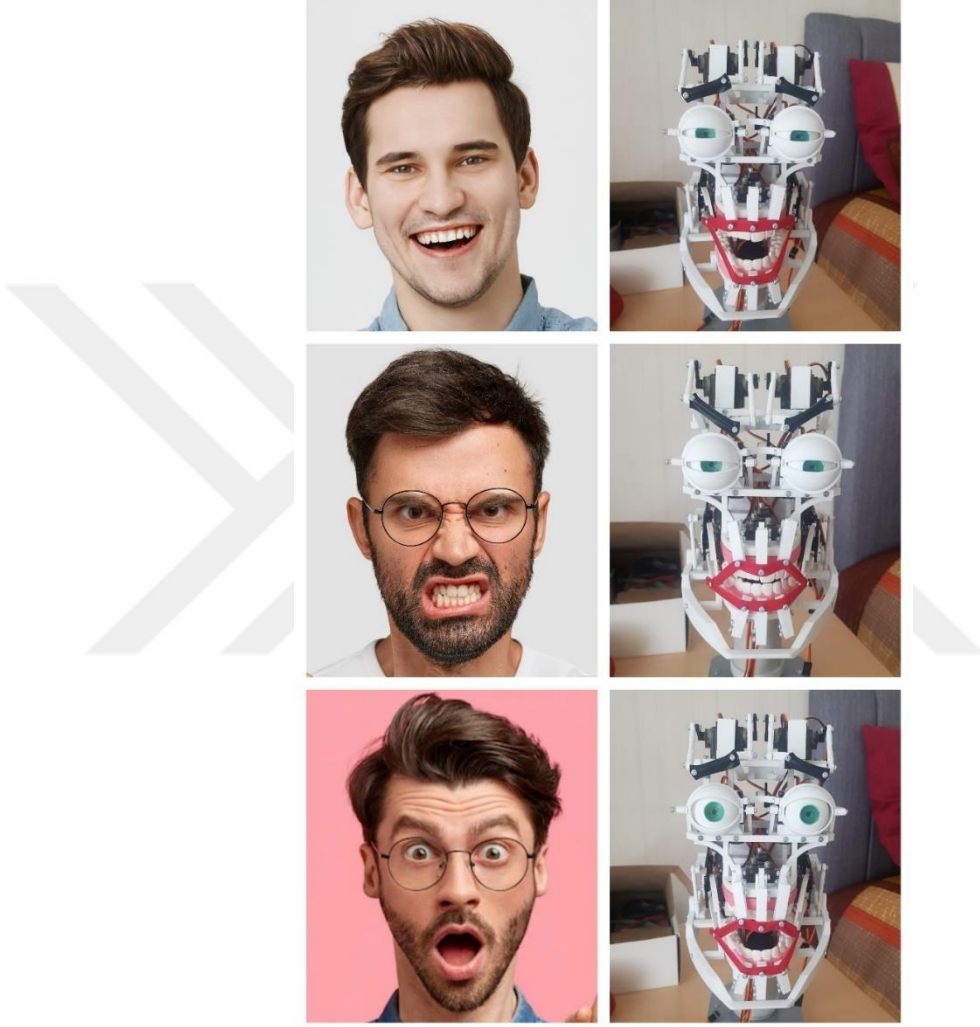
Şekil 32. Animatronik Robot Suratın Temel Mekanizma Montajı

Bu görselde, animatronik robot suratın temel kaş, göz ve ağız mekanizmalarının montajı gerçekleştirilmiştir. Ardından son materyaller eklenerek animatronik robot surat, yüz mimikleri daha belirgin hale getirilmiş haliyle, Şekil 33. 'de gösterilmiştir.



Şekil 33. Animatronik Robot Suratın Tamamlanmış Hali

Animatronik robot suratın dudak ve kaş bölgeleri belirginleştirilerek, insan mimiklerinin algılanmasında kolaylık sağlanmıştır. Kas yapısı ile benzer tasarlanan mekanizmalar, belirli duygu durumlarını, herkes tarafından anlaşılabilir seviyede simüle etmeyi başarmıştır. Farklı duygu durumlarının simüle edilmiş halleri, Şekil 34. 'de gösterilmiştir.



Şekil 34. Animatronik Robot Suratın Farklı Duygu Durumlarını Simüle Ediş

Yukarıda verilen görselde de görüldüğü gibi bu projede tasarlanan ve üretilen animatronik robot suratında, her bir duygu durumu için yüz kaslarının hareketleri incelenmiş ve bu hareketler doğrultusunda servo motorların konumları programlanarak duygu mimikleri simüle edilmiştir.

İnsansı robot terimi bir çok farklı disiplinin bir araya gelmesi ile oluşan bir yapıdır. Bu yapı içerisinde mekanik tasarım, elektronik ve yazılım ana konulardır. Bu projede mekanik tasarım konusu üzerine çalışma yapılmıştır. İnsansı robotlar üzerine Türkiye 'de çok az çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle İnsansı Yüz Mimiklerine Sahip Animatronik Robot Surat projesi, maliyet sınırları içerisinde öncü niteliğindedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan bu çalışmada insansı yüz mimikleri, çeşitli mekanik tasarımlar ile simüle edilmiş ve bu hareket, servo motorlar ile sağlanmıştır. Uygun maliyetli olması ve daha önce yapılan çalışma sayısının yok denecek kadar az olması sebebiyle Türkiye için bu alandaki öncü projelerden biridir.

İnsansı Yüz Mimiklerine Sahip Animatronik Robot Surat, yapılan çalışma ve geliştirmelerin sonucunda, herkes tarafından aynı şekilde yorumlanabilecek seviyede gerçekçi yüz mimiklerini simüle edebilmektedir. Kodlama sırasındaki duygu durumları seçilirken temel duygular baz alınmıştır. Bunlar öfke, şaşkınlık, mutluluk, mutsuzluk ve kafa karışıklığı gibi ifadelerdir. Bu ifadeler sırasında dudak mekanizmasının ortasındaki referans noktaları destekleyici işlev görürken, kalan altı referans noktası, duygu ifadelerinde belirleyici rol oynamaktadır. Göz mekanizmasında özellikle göz kapakları, duygu durumlarını pekiştirici rol üstlenirken göz hareketleri duygu durumlarından çok, insansı algıyı yaratmak için kullanılmaktadırlar. Gerçekleştirilen duygu simülasyonlarındaki önemli pekiştiricilerden birinin de kaş mekanizması olduğu görülmektedir. Bu algıyı yaratırken basit tutulan mekanizma, dört farklı referans noktasına indirgenmiştir. Daha komplike çalışmalarda altı referans noktalı kaş mekanizmaları da görülmektedir.

Mekanizmaların tahriki için mikro servolar kullanılmış ve yapısal açıdan yalnızca hareket verme görevini üstlendiklerinden torkları konusunda yeterli gelmektedirler. Bu servolar, motor sürücü üzerinden PWM sinyalleri ile kontrol edilmektedir ve servo hızları optimum seviyede tutulmuştur. Aktif kullanımda motorların aşırı ısınmaması için yeterli aralıklar ile yerleştirilmiş olan servo motorlar, yüksek voltajdan etkilenmemesi için voltaj regülatörü ile koruma altına alınmış ve kullanılan voltaj kontrol altında tutulmuştur. Çene motorlarında daha fazla güç gerekeceğinden mikro servolar yerine daha güçlü olan MG996 servoları kullanılmıştır. Servo güçleri yeterli gelse de en çok kullanılan fonksiyon çene açma-kapama hareketidir. Çene altında tasarlanan slot yapısı, bu hareket esnasında gerekli esnekliğin sağlanması ve az miktarda ileri geri hareketi için kullanılmaktadır.

Bu projede, mekanik tasarım üzerine odaklanılmış ve buna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle elektronik ve yazılım bölümünde, insansı animatronik robot suratın kabiliyetlerinin sergilenebileceği kadar bir çalışma yapılmıştır. Servo sürücü yazılımında bulunan aksiyon grubu özelliği ile birden fazla servo önceden belirlenmiş konumlar için kodlanmakta ve kararlaştırılan yüz mimikleri oluşturulmaktadır.

Projenin ileriki safhalarında geliştirilmeye açık yönü nedeniyle kaynak araştırması kısmında da bahsedilen diğer çalışmalarda kullanılabilir. Bu aşamada görsel tanımlama ile otonom kontroller için servo sürücülerden daha güçlü işlemciler gerekmektedir. Bu aşamada bilgisayar ya da Raspberry Pi benzeri tümleşik kart kullanılabilir. Bu sayede robota bir kamera bağlanabilir ve bu kamera sayesinde animatronik robot surata, çevresini algılama yeteneği kazandırılabilir. Bu noktada daha gelişmiş bir yazılım ve kodlama gerekecektir. Ancak bu sayede basit ölçekte yapay zeka eklenebilir ve proje ileriye yönelik üzerinde farklı çalışmalar yapılacak şekilde evrilebilir.

Bunun dışında yapılabilecek geliştirmelerden bir diğeri, sabitleme kısmı yerine boyun mekanizması tasarlanarak robot surata daha fazla serbestlik kazandırılabilir ve bu sayede insansı özellikleri artırılabilir. Bununla birlikte etrafını algılama menzili artacak ve çevresiyle daha efektif şekilde etkileşime girebilecektir.

İnsansı görünümü artırmak adına silikon yüz derisi eklenebilir. Bu aşamada kullanılan silikon yüz yeterli incelikte olmadığına, mekanizma kontrolünde görev alan servo motorlarda daha fazla güç ihtiyacı doğacaktır. Daha güçlü servo motorlar daha fazla alan gerektirdiğinden boyutları korumak adına, mekanizmalar ile yüz kası simülasyonu yerine kablo sistemi ile yüz kası simülasyonunun kullanılması daha uygun olacaktır. Çünkü bu yöntemde servo motorlar kafanın arka kısmındaki görece daha geniş alana topluca yerleştirilmektedir. Bu sayede yüz kaslarının simüle edileceği ön tarafta yeterli alan elde edilebilmektedir. Eğer yeterli incelikte silikon yüz derisi elde edilirse, mevcut tasarım yeterli olmaktadır.

Son olarak benzer projelerde proje kapsamı genişletilerek, insansı robotlara gövde, kol ve el mekanizmaları da eklenmektedir. Bu tür çalışmalar, animatronik robot suratta olduğu gibi başlı başına yeni mekanizma tasarımları gerektirir. Biyomimikri alanında yapılan benzer çalışmalardan yararlanılarak, diğer uzuv tasarımları üzerine yapılacak yeni tasarımlar, aynı şekilde daha gelişmiş elektronik ve yazılım çalışmalarına ihtiyaç duyacaktır.



KAYNAKLAR

Chen, Boyuan ve Hu, Yuhang ve Li, Lianfeng ve Cummings, Sara ve Lipson, Hod. (2021). Smile Like You Mean It: Driving Animatronic Robotic Face with Learned Models.

Chen, Yizhou ve Liu, Xiaofeng ve Li, Jie ve Zhang, Tingting ve Cangelosi, Angelo. (2021). Generation of Head Mirror Behavior and Facial Expression for Humanoid Robots. 10. 10.54364/AAIML.2021.1110.

Cogley W. (2019). <http://www.nilheim.co.uk/latest-projects-and-blog/compact-and-robust-3d-printed-animatronic-eye-mechanism>

Fitzpatrick R. (2010), "Designing and Constructing an Animatronic Head Capable of Human Motion Programmed using Face-Tracking Software Table of Contents," tech. rep., Worcester Polytechnic Institute, 2010.

Ishihara, Hisashi ve Ota, Nobuyuki ve Asada, Minoru. (2017). Derivation of simple rules for complex flow vector fields on the lower part of the human face for robot face design. *Bioinspiration & Biomimetics*. 13. 10.1088/1748-3190/aa8f33.

Oh J.H., Hanson D., Kim D. (2006), "Design of android type humanoid robot Albert HUBO." *Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2006.

Rusu, Dan-Mihai ve Elena, Biris. (2020). DESIGNING AN ANIMATRONIC HUMANOID ROBOTIC HEAD. 64. 461-466.

Sato, Wataru ve Namba, Shushi ve Yang, Dongsheng ve Nishida, Shin'ya ve Ishi, Carlos ve Minato, Takashi. (2022). An Android for Emotional Interaction: Spatiotemporal Validation of Its Facial Expressions. *Frontiers in Psychology*. 12. 10.3389/fpsyg.2021.800657.

Wagshum, Asheber ve Lin, Chyi-Yeu ve Yen, Shih-Hsiang. (2016). Humanoid Head Face Mechanism with Expandable Facial Expressions. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 13. 1. 10.5772/62181.